

具有自适应电感共享策略的压电 能量收集电路设计与实现

范世全, 朱一诺, 王波仁, 马蔚青, 张国和

(西安交通大学电子与信息学部, 710049, 西安)

摘要: 针对以电池为能量供给的传感设备必然存在因电池寿命的限制或自身电能的逐渐耗尽而造成的失效问题,提出了一种具有自适应电感共享策略的压电振动能量收集电路,通过将环境中的机械振动能量最大化地转换为电能并供给传感设备使用,可实现传感设备的无电池自获能供电,并大幅延长传感设备的使用寿命。该能量收集电路在原有并联电感的同步开关收集电路结构和 buck-boost 功率级拓扑的阻抗匹配变换器结构基础上,通过建立“先到先得”的自适应电感共享策略,避免了仲裁器的使用,大幅简化了电路设计,并实现了仅需单一电感的压电振动能量收集系统,提升了系统的集成度。此外,对电感共享造成的竞争给出了详细分析,并在此基础上进一步优化了整体电路,实现了最大功率点追踪算法。采用标准 180 nm CMOS 工艺,完成了压电能量收集电路的设计工作。仿真结果表明: bias-flip 整流器在 2 V 和 3 V 开路电压激励下,输出功率分别达到了 55.01 μW 和 111.59 μW ,较传统全桥整流器,分别实现了 6.40 倍和 4.48 倍的输出功率提升;引入电感共享策略后,变换器的最大输出功率可达 110.04 μW ,相比于非电感共享策略,电感共享策略下变换器峰值输出功率提升了 7.9%,峰值功率转换效率达到了 91%。所设计的自获能压电能量收集系统有望解决现有传感设备的供电问题。

关键词: 自获能;电感共享策略;最大功率点追踪;整流器;阻抗匹配变换器;压电能量收集

中图分类号: TN712+.5; TN384 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202205010 **文章编号:** 0253-987X(2022)05-0095-10



OSID 码

Design and Implementation of Piezoelectric Energy Harvesting Circuit with Adaptive Inductor Sharing Strategy

FAN Shiquan, ZHU Yinuo, WANG Boren, MA Weiqing, ZHANG Guohe

(Faculty of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A battery-powered sensing device may fail for limited battery life or electrical depletion of the device itself. To solve the problem, a piezoelectric energy harvesting circuit with the adaptive inductor sharing strategy is proposed in this paper. The energy of mechanical vibration in the environment can be converted to electric energy to power the sensing device. This can enable self-powering and significantly lengthened life of the sensing device. Based on original structures of the P-SSHI and buck-boost power stage-based impedance matching converter, the proposed circuit with the “first come, first served” adaptive inductor sharing strategy requires no use of an arbiter. Thus, the circuit is greatly simplified, and the system that only requires a single inductor is realized, which improves the integration. Additionally, sharing-caused

competition is analyzed, the entire circuit is further optimized, and the MPPT algorithm is realized. The standard 180 nm CMOS process is applied for circuit design. The simulation results show that the bias-flip rectifier has an output power up to $55.01 \mu\text{W}$ and $111.59 \mu\text{W}$ under the OCV of 2 V and 3 V respectively. Compared with a conventional full-bridge rectifier, it increases the output power by 6.4 times and 4.48 times respectively. With the inductor sharing strategy, the peak output power of the converter can reach $110.04 \mu\text{W}$. Compared with that without such a strategy, the peak output power is increased by 7.9% and the peak PCE reaches 91%. The self-powered piezoelectric energy harvesting system is expected to solve the power supply problem of existing sensing devices.

Keywords: self-powering; inductor sharing strategy; maximum power point tracking; rectifier; impedance matching converter; piezoelectric energy harvesting

电池的广泛使用制约着传感设备快速发展,尤其是在使用频繁且不易更换电池的环境中,例如火电厂的热交换厂房的环境温度监测传感器、高压电网变电站中变压器振动传感设备、写字楼中的环境传感节点、体内植入式医疗装置等。在这些应用中,电池是主要的能量供给方式。然而,无论选用多大容量的电池,由于电池寿命的限制以及自身电能的逐渐耗尽,最终这些设备均会因供电不足而失效^[1-4]。如果能通过收集环境中的各种能量,并通过换能器将其转换为电能,为电子设备进行自供电,从而避免电池的使用,并大幅提升设备的使用寿命,则有望解决这类应用场景中因使用电池而带来的供电问题^[5-6],并且对传统植入式医疗装置中无线通信电路功耗高、面积大、通信距离短的问题也有极大改善作用^[7-9]。此外,在各种各样的环境能量中,压电振动能量较为常见,能量密度较高且对应的能量收集装置体积较小。因此,针对压电振动能量收集系统的研究成为了国内外学者关注的热点。

国外学者针对该领域的研究起步较早,首个压电振动能量收集的接口电路于2002年由Ottman等^[10]提出,该接口电路采用了基本的无源全桥整流结构,被称为压电振动的标准能量收集(standard energy harvesting, SEH)结构;该接口电路通过对压电换能器的交变电流进行整流、并用超级电容来储存能量,实现了从振动到电能完整转换和收集过程,无需外部电源,足以满足许多电子系统的电力需求。为优化能量收集的效率,2005年Guyomar^[11]提出了一种可应用在压电振动能量收集电路中的非线性技术,即并联电感同步开关收集技术(parallel-synchronized switch harvesting inductor, P-SSHI);该技术利用并联电感构成谐振电路,在压电换能器的电流过零点时对内部电容上存储的电荷进行翻

转,从而避免了电荷的抵消,因此,输出功率大幅提升。2006年法国里昂大学的Lefeuvre等^[12]提出了同步电荷提取技术(synchronous electrical charge extraction, SECE)和串联电感同步开关收集技术(series-synchronized switch harvesting inductor, S-SSHI),实现了不错的性能指标。2010年,Ramadas等^[13-14]基于P-SSHI技术设计实现了一款高效率压电振动能量收集芯片,该芯片采用标准 $0.35 \mu\text{m}$ CMOS工艺设计,相较传统SEH结构,输出功率提升约4倍。2011年Krihely等^[15]提出了一种改进的P-SSHI方案,该改进方案通过谐振电路实现,在恒定谐波激励下,输出功率为SEH结构的2.3倍,因此该系统作为可变励磁驱动的自供电系统可行性很高。2017年Du等^[16]提出了一种基于电容同步开关收集技术(synchronized switch harvesting capacitor, SSHC),通过采用开关电容阵列,实现了对压电换能器内部电容上电荷的翻转,并避免使用电感。国内学者在该领域研究较少,主要集中在新结构、单芯片实现及新兴领域应用等方面^[17-19]。

本文基于P-SSHI结构提出了一种电感共享结构的压电振动能量收集系统架构,该电感共享策略采用“先到先得”的设计思想,并优化了bias-flip结构整流器,再结合buck-boost变换器结构,进一步实现了最大功率点追踪策略,最终完成了压电振动能量收集电路的设计。

1 压电能量收集系统原理

1.1 压电能量收集系统结构

提出的压电能量收集系统整体结构如图1所示。压电换能器输出的交流电经过bias-flip整流器后被转换为直流电初步存储在节点 V_{rec} 的滤波电容上; V_{rec} 节点作为buck-boost变换器的输入,将能量

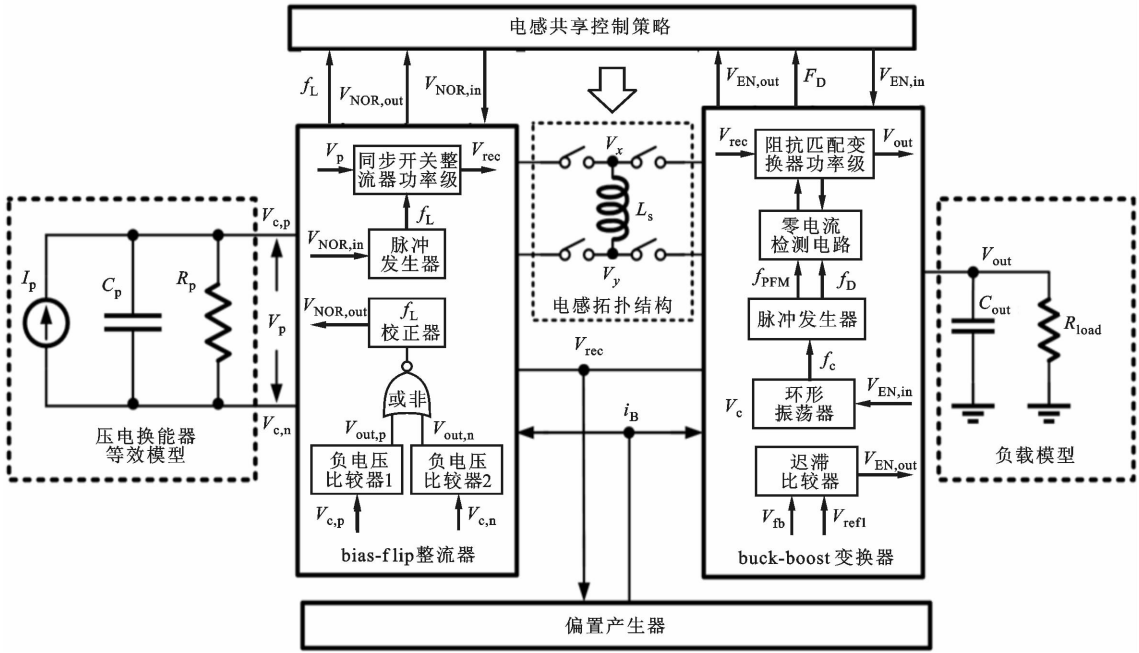


图 1 压电能量收集系统整体结构

Fig. 1 Architecture of piezoelectric energy harvesting system

进一步储存在输出节点 V_{out} 的存储电容上,为后续负载供能;同时,为保证能量收集芯片的正常工作, V_{rec} 节点又作为芯片内部控制电路的电源,以确保电压基准、电流偏置^[20]、振荡器等模块的正常工作。

此外,在 bias-flip 整流器和 buck-boost 变换器的设计实现中,采用“先到先得”的自适应电感共享策略,实现这两模块对电感的共享使用。

1.2 bias-flip 整流器原理

本文基于 P-SSHI 技术设计了 bias-flip 整流器,实现了对压电换能器输出的高效率整流,整流器的原理和工作过程示意波形如图 2 所示。

该 bias-flip 整流器结构是在全桥整流器基础上,增加了一个同步开关控制的并联电感,通过在压电换能器输出电流过零点时开启电感同步开关,利

用电阻-电感-电容 (resistance-inductance-capacitance, RLC) 谐振回路实现对压电换能器内部电容上电荷的翻转,避免了电荷损失,提升了输出功率。经推导,其整流输出功率表达式^[13-14]为

$$P_{BF} = 2C_p V_{rec} f_p \left[2V_p - (V_{rec} + 2V_D)(1 - e^{-\tau}) - \frac{\pi k_{BF} (V_{rec} + 2V_D)}{Q_p} \right] \quad (1)$$

式中: $Q_p = \omega_p C_p R_p$; $\tau = \pi\beta/\omega$; $\beta = R_{BF}/2L_s$; $\omega = \sqrt{1/(L_s C_p) - \beta^2}$; $k_{BF} = \frac{[V_p + (V_{rec} + 2V_D)e^{-\tau}]\omega_p t_1}{\pi(V_{rec} + 2V_D)} - \frac{V_p \sin\omega_p t_1}{\pi(V_{rec} + 2V_D)} + \frac{\pi - \omega_p t_1}{\pi}$; $\omega_p t_1 = \arccos[1 - (V_{rec} + 2V_D)(1 - e^{-\tau})/V_p]$; f_p 为压电换能器输出频率; V_p 为压电换能器输出开路电压; V_D 为二极管导通压

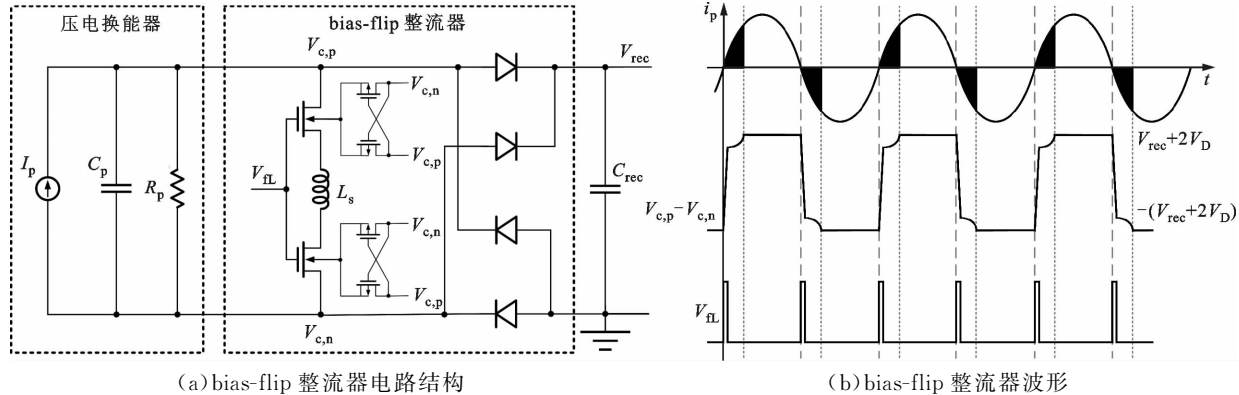


图 2 bias-flip 整流器的原理和工作过程示意波形

Fig. 2 Bias-flip rectifier

降; R_{BF} 为 RLC 路径上的寄生电阻。

通过引入等效品质因数 Q_{BF} , 可同时概括 RLC 系统原品质因数和压电换能器模型品质因数 Q_p 产生的影响, 记做

$$Q_{BF} = 1/(1 - e^{-\tau} + \pi k_{BF}/Q_p) \quad (2)$$

通常情况下 τ 趋近于 0, k_{BF} 趋近于 1, $Q_p \gg 1$, 因此 Q_{BF} 大于 1^[13]。由此可知 bias-flip 整流器的最大输出功率及此时 V_{rec} 的取值 $V_{rec, max}$ 可被简化为

$$P_{BF, max} = 2C_p f_p Q_{BF} (V_p - V_D/Q_{BF})^2 \quad (3)$$

$$V_{rec, max} = V_p Q_{BF} - V_D \quad (4)$$

相比于全桥整流器的最大输出功率表达式为 $P_{FB, max} = C_p f_p (V_p - 2V_D)^2$, 由式(3)可知, 在全桥整流器中增加并联电感后, 通过 RLC 谐振回路对压电换能器寄生电容上电荷的翻转, 使得压电换能器两端的等效峰值电压由 V_p 变为 $\sqrt{2Q_{BF}} V_p$, 而 $Q_{BF} > 1$, 因此输出功率得以大幅提升。

1.3 buck-boost 变换器原理

阻抗匹配变换器单元采用如图 3 所示的脉冲频率调制 (pulse frequency modulation, PFM) buck-boost 变换器结构^[17-18], 并将输出的能量进行储存。在图 3 中将电感的左右两侧节点分别定义为 x 和 y 节点, 左侧节点电压为 V_x , 与左侧节点相连的 NMOS 和 PMOS 分别定义为 MN_x 和 MP_x ; 右侧节点电压为 V_y , 与右侧节点相连的 NMOS 和 PMOS 分别定义为 MN_y 和 MP_y 。

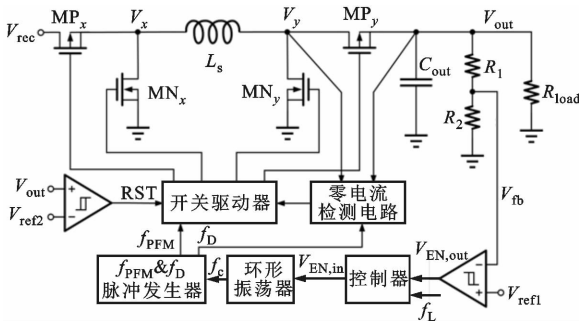


图 3 buck-boost 变换器结构图

Fig. 3 Schematic of buck-boost converter

该电路通过控制电感两侧的 4 个同步开关 (MP_x 、 MN_y 和 MP_y 、 MN_x) 依次两两导通, 实现能量从滤波电容 C_{rec} 到电感 L_s 、再到存储电容 C_{out} 的转移。经推导, 变换器的传输功率为

$$P_{con} = V_{rec}^2 t_{on}^2 f_c / (2L_s) \quad (5)$$

式中: t_{on} 为 f_{PFM} 信号的脉宽; f_c 为环形振荡器输出信号的频率, 即变换器的工作频率。

1.4 最大功率点追踪策略原理

本文采用动态追踪的阻抗匹配最大功率点追踪 (maximum power point tracking, MPPT) 策略, 通过变换器与整流器部分的阻抗匹配实现能量传输功率的最大化, 原理如图 4 所示。当初始点位于最大功率的右半边时, 随着 f_c 的增加, R_{eq} 和 V_{rec} 减小, P_{rec} 逐渐增加到峰值 P_{max} ; 当功率进入左半边时, 随着 f_c 的持续增加, R_{eq} 和 V_{rec} 进一步减小, P_{rec} 开始下降并逐渐到 0。

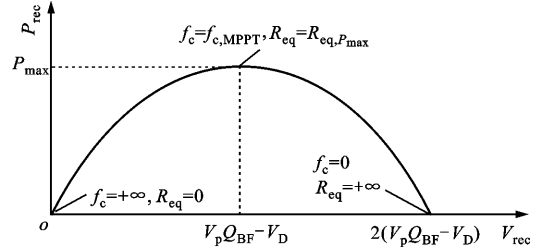


图 4 MPPT 策略原理

Fig. 4 Principle of MPPT

由式(3)和(5)可知, 在整流器输出功率最大处, 变换器的最优工作频率表达式为

$$f_{c, MPPT} = 4L_s C_p f_p / (t_{on}^2 Q_{BF}) \quad (6)$$

2 电感共享策略

2.1 电感共享简述

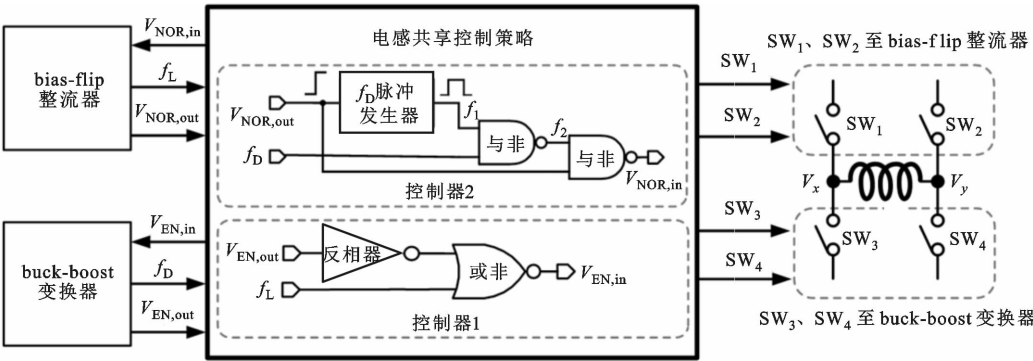
电感作为一种外围器件, 在电路集成时会占用可观的芯片或印制电路板 (printed circuit board, PCB) 面积, 不利于未来微型化的发展要求。同时, 考虑到整流器和变换器两模块在工作时对电感的占用率均不高, 因此可以通过设计相应的控制逻辑, 使得两模块共用同一个电感。

近年来提出的电感共享策略大多采用锁存器结构来构造仲裁器实现所需的功能^[21-24], 本文在已有方法的基础上, 提出了一种基于“先到先得”的自适应电感共享策略。该策略通过判定整流器和变换器中电感使用信号的先后顺序, 使能先进入工作状态的模块暂时复位另一模块, 直至使能模块对电感的使用结束, 复位结束, 两模块再次进入待命状态, 避免使用电感时产生竞争。与传统锁存结构实现的电感共享策略相比, 本文采用的方法更为简洁, 即直接通过异步组合逻辑电路来实现正确的功能, 减少了锁存器结构与相关电路造成的额外面积占用; 此外, 控制电路的功耗也得以降低; 与此同时, 作为最优解的“先到先得”策略, 该方法响应速度最快, 因此将额外的电荷损失控制在最低水平。

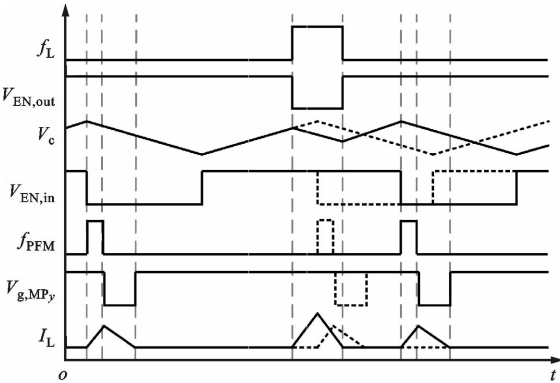
2.2 电感共享原理实现

本文提出的电感共享策略如图 5 所示。对于时序示意图 5(b),在整流器获取电感使用权时,利用整流器中的 f_L 信号和变换器中的 $V_{EN,out}$ 信号,通过控制器 1 产生新的 $V_{EN,in}$ 使能信号,暂时复位变换器中的环形振荡器,使得变换器在整流器使用电感期间,无法获得 f_c 信号的下降沿来触发 f_D 和 f_{PFM} 信

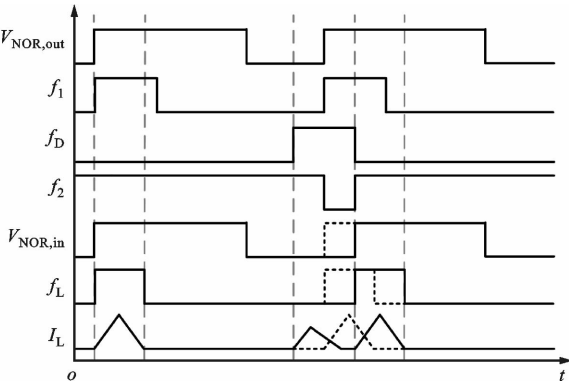
号,完成对变换器的复位。对于时序波形示意图 5(c),在变换器获取电感使用权时,利用变换器中的 f_D 信号和整流器中的 $V_{NOR,out}$ 信号,通过控制器 2 产生新的 $V_{NOR,in}$ 宽脉冲信号,复位了 $V_{NOR,out}$ 信号与 f_D 信号的交叠部分,使得整流器在变换器使用电感期间,触发 f_L 脉冲发生器的上升沿向后推迟,从而完成对整流器的复位。



(a)电感共享策略原理图



(b)控制器 1 时序示意图



(c)控制器 2 时序示意图

图 5 电感共享策略

Fig. 5 Inductor sharing strategy

2.3 电感共享存在的问题及解决方案

本文设计的电感共享策略实现了单电感的整流器和变换器共享使用,提升了系统集成度。相对于已有的电感共享技术而言,提出的策略在原理和实现上更加简洁。与此同时,由于电感共享策略的引入,在电路设计与实现中又存在 3 个方面的挑战。

2.3.1 电感两端互连漏电引起逻辑错误的分析

整流器和变换器中,由于两模块均连接在电感两侧的 V_x 和 V_y 节点,与 V_x 和 V_y 节点相连的金属-氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)会在两模块中某一模块使用电感时造成 MOSFET 体二极管导通漏电现象,干扰两模块的工作状态,并导致逻辑错误。由于整流器工作时的电流流向不定,会造

成 $V_{c,p}$ 和 $V_{c,n}$ 节点始终有一端存在负电压,无论将 MOSFET 体端接源漏端或者接地处理,均会导致某些工作状态下存在漏电;而对于变换器,在开关管交替时的不交叠时间段,需要利用 MOSFET 体二极管进行续流,因此无法通过体端连接的方式消除体二极管导通漏电。

本文采用如图 2(a)所示的体端低电压自适应选择电路^[25],通过动态选择较低电压来为整流器中与 V_x 和 V_y 节点相连的开关 NMOS 做体偏置,从而消除了体二极管漏电。电路实际工作中,在整流器使用电感时,依然会在压电换能器电容上电荷翻转时,通过变换器中开关管的体二极管造成少量的漏电,但是由于损失电荷比例较低,且漏电电流最终

进入 C_{rec} 和 C_{out} , 造成的负面影响可以忽略不计。

2.3.2 bias-flip 整流器在翻转压电换能器电容

两端电荷时的负电压过冲现象

虽然漏电造成电荷损失的影响几乎可以忽略, 但是由于压电换能器电容上电荷翻转时电压节点 ($V_{c,p}$ 和 $V_{c,n}$) 的浮空, 从而产生正电压向负电压翻转后的值比翻转前负电压值更低的过冲现象, 使负电压比较器的结果产生非理想抖动, 造成 f_L 脉冲提前结束, 并且会产生一个或多个紧随其后的多重脉冲, 如图 6(a) 所示。该多重脉冲的存在有可能造成系统无法正常工作, 并且还会造成额外的电荷损失,

影响能量收集效率。

为确保压电能量收集系统的正常且高效工作, 设计了合适的修正电路, 并给出了如图 6(b) 所示的 f_L 信号多重脉冲及其修正后仿真波形的对比。修正电路的设计思想和工作原理如下: 利用负电压比较器的输出信号下降沿来产生一个宽脉冲信号, 该宽脉冲信号被用来屏蔽另一个负电压比较器的错误输出信号, 进而消除该非理想现象。加入修正电路后的仿真结果如图 6(c) 所示。仿真结果表明, 经过修正后的电感开关驱动信号 f_L 以及 $V_{c,p}$ 和 $V_{c,n}$ 信号工作波形正常且符合预期, 非理想现象被完全消除。

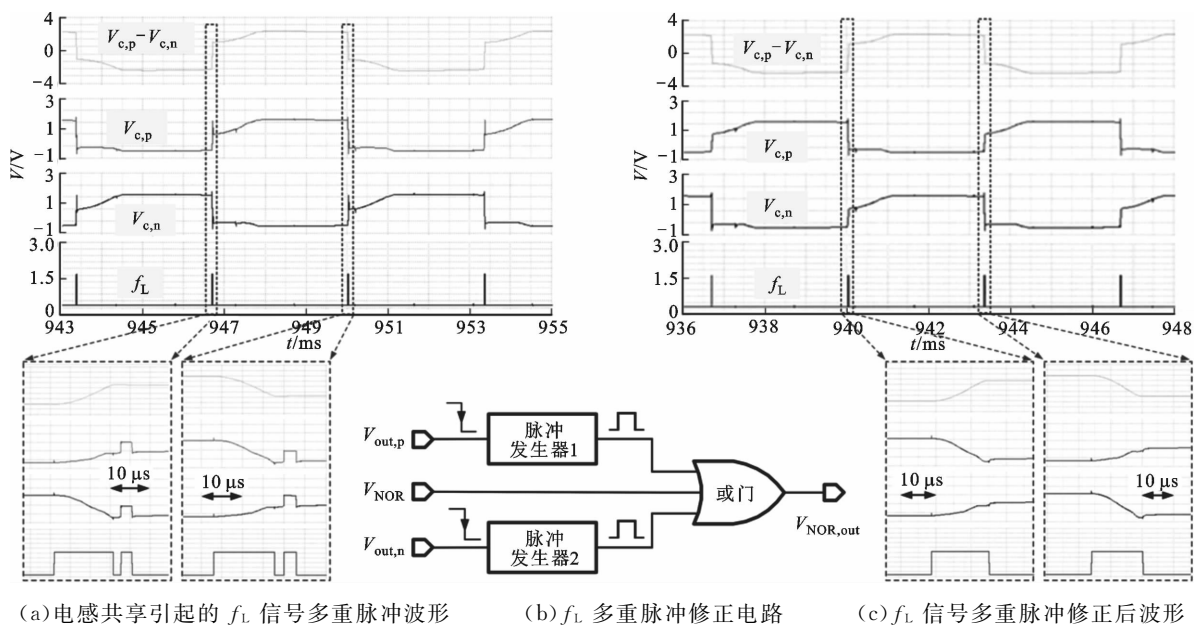


图 6 f_L 信号多重脉冲及其修正后仿真波形对比

Fig. 6 Multi-pulse and correction waveform of f_L signal

2.3.3 电感共享策略下因变换器工作造成整流器

延迟工作带来的电荷损失分析

由于本文设计的压电振动能量收集系统采用了电感共享来减少电感器件, 这必然会出现整流器和变换器同时使用电感的情况。基于“先到先得”的自适应电感共享策略, 当变换器在使用电感时, 若整流器也需要使用电感, 则控制电路会推迟整流器使用电感的时间, 直至变换器结束对电感的使用。该延迟必然会导致 bias-flip 整流器错过最佳翻转电荷的时间, 造成如图 7 所示的压电换能器内部寄生电容上电荷的损失。

图 7 中的 q_{loss} 代表理想情况下的电荷损失, 而 q'_{loss} 代表一定延迟后的电荷损失。结合具体设计, 考虑到压电换能器振动频率通常不大于 200 Hz, 电流过零点时 bias-flip 整流器的工作时间为

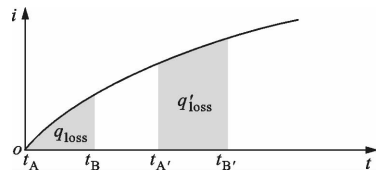


图 7 电感共享引起整流器电荷损失示意图

Fig. 7 Rectifier charge loss caused by inductor sharing

$\pi \sqrt{L_s C_p}$, 即 f_L 脉宽约为 15 μ s。假设变换器的 f_D 信号脉宽通常小于 30 μ s, 压电换能器振动周期 $T = 5$ ms。电感共享策略造成 bias-flip 整流器的最大延迟约为一个 f_D 信号的脉宽, 且工作时长为 15 μ s。假定最佳翻转电荷的起始点为换能器电流过零点, 则有 $t_{AB} = t_{BA'} = t_{A'B'} = 15$ μ s。由此可知, bias-flip 整流器分别在最佳翻转电荷和有 30 μ s 延迟翻转电荷的电荷损失占比 R_{opt} 和 R_{td} 分别为

$$\left\{ \begin{aligned} R_{\text{opt}} &= \frac{q_{\text{loss}}}{Q} = \frac{\int_{t_A}^{t_B} \sin(2\pi t/T) dt}{\int_0^{T/2} \sin(2\pi t/T) dt} = 0.0036\% \\ R_{\text{td}} &= \frac{q'_{\text{loss}}}{Q} = \frac{\int_{t_A'}^{t_B'} \sin(2\pi t/T) dt}{\int_0^{T/2} \sin(2\pi t/T) dt} = 0.0180\% \end{aligned} \right. \quad (7)$$

由式(7)可知,虽然延迟造成了多达 5 倍的电荷损失,但是电荷损失比之差 $\Delta = R_{\text{td}} - R_{\text{opt}} = 0.0144\%$ 依然是非常小的值。综上所述,在电感共享策略下,因变换器工作造成整流器延迟工作带来的电荷损失所占电容电荷比例微乎其微,可忽略不计。

3 仿真结果与分析

通过使用标准 180 nm CMOS 工艺,完成了电路的搭建和仿真,参数设置如下:压电换能器参数为 $C_p=30\text{ nF}$, $R_p=600\text{ k}\Omega$, $f_p=200\text{ Hz}$,电感 $L_s=820\text{ }\mu\text{H}$ 。仿真结果与分析如下。

3.1 bias-flip 整流器仿真与分析

在不同开路电压和负载下,对设计的 bias-flip 整流器和传统全桥整流器进行了仿真,获得了如图 8 所示的输出功率 P_{rec} 与输出电压 V_{rec} 之间的关系。

表 1 整流器仿真结果
Table 1 Simulation results of rectifier

开路电压 V_p/V	整流接口类型	最优负载 $R_{\text{load}}/\text{k}\Omega$	对应电压 V_{rec}/V	最大功率 $P_{\text{rec}}/\mu\text{W}$	功率提升比
3.0	bias-flip 整流器	97	3.290	111.59	4.48(111.59/24.90)
	全桥整流器	59	1.212	24.90	
2.5	bias-flip 整流器	129	3.270	82.87	
2.0	bias-flip 整流器	190	3.233	55.01	6.40(55.01/8.60)
	全桥整流器	57	0.700	8.60	
1.5	bias-flip 整流器	370	3.189	27.49	

3.2 buck-boost 变换器仿真与分析

本文对设计的 buck-boost 变换器分别在电感共享与非电感共享条件下,改变其工作频率,仿真了输出功率 P_{rec} 与输出电压 V_{rec} 的关系,结果如图 9 所示。其中压电换能器开路电压为 $V_p=3\text{ V}$ 。

在非电感共享策略下,变换器最大输出功率同样在 V_{rec} 接近 3.3 V 处取得,其值为 101.95 μW ,对应变换器工作的最优频率为 672 Hz;该点处变换器功率转换效率 η 高达 91%。在电感共享策略下,变换器的输出功率有所提升,其中在 V_{rec} 为 3.2 V 附近时取得最大值,最大输出功率为 110.04 μW ,此时

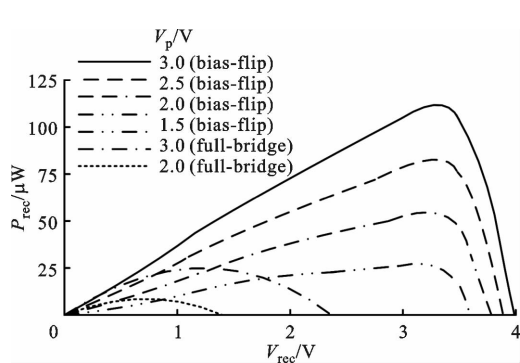


图 8 整流器输出功率与输出电压仿真曲线
Fig. 8 Simulated P_{rec} vs V_{rec} of the rectifier

从图 8 中可以看出,整流器输出功率随 V_{rec} 的增加先升高后下降。其中,对于同类型的整流器,开路电压 V_p 越大则输出功率越高;在相同的开路电压 V_p 条件下,bias-flip 整流器的输出功率较全桥整流器有着显著提升。bias-flip 整流器分别在 2 V 和 3 V 开路电压激励下,输出功率分别达到了 55.01 μW 和 111.59 μW ,较相同开路电压激励下传统全桥整流器所达到的 8.60 μW 和 24.90 μW 输出功率,分别实现了 55.01 $\mu\text{W}/8.60\text{ }\mu\text{W}=6.40$ 倍和 111.59 $\mu\text{W}/24.90\text{ }\mu\text{W}=4.48$ 倍的功率提升比,整流器仿真结果如表 1 所示。

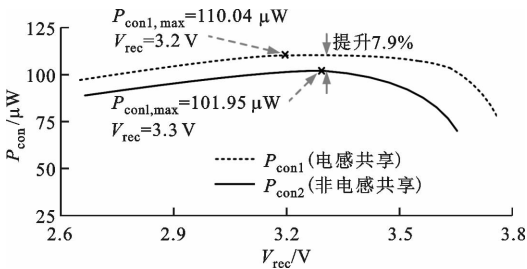


图 9 变换器输出功率仿真结果
Fig. 9 Simulated output power of the converter

对应的变换器工作最优频率为 715 Hz,功率转换效率几乎不变。

此外,在输入源参数不变的条件下,相比于非电感共享策略,电感共享条件下变换器的峰值输出功率提升了 7.9%。这是因为电感共享条件下,整流器使用电感时,存在经变换器的功率 PMOS 管体二极管向 C_{out} 微弱放电现象,导致实际变换器的输出功率进一步增加。

3.3 压电能量收集系统仿真与分析

C_{rec} 和 C_{out} 设定为 $10\text{ }\mu\text{F}$,输入激励对应开路电压 $V_p=3\text{ V}$,振荡器电容 C_{osc} 设为 15 pF ,对应变换器工作频率为 491 Hz 。压电能量收集系统瞬态仿真结果如图 10 所示。

从图 10 可以看出,在 1.63 s 时间内,输出电压 V_{out} 从 0 升高至超过设定的 3 V ,完成整体电路对输出电容的充电过程。在 841 ms 时 V_{out} 达到 942 mV ,此时输出电压能够正常驱动 MP_y 管, MP_y 管从续流模式进入到同步整流模式,同时针对该 PMOS 管的零电流检测(zero current detection, ZCD)电路

也进入正常工作模式,如图 10 中小图(2)所示;当 V_{out} 达到 3 V 后,变换器输出电压达到预设值,使能信号复位,变换器停止工作,如图 10 中小图(4)所示,但是由于电感共享节点的额外放电, V_{out} 在此后一段时间仍会缓慢增加。

由于自适应电感共享策略为“先到先得”,必然会在整流器和变换器共同竞争使用电感的情况,如图 10 中的小图(1)和(3)所示,在 746.7 ms 处,整流器先于变换器获得电感使用权;在 1.34 s 处,变换器先于整流器获得电感使用权。综上所述,电感共享策略成功解决了电感的竞争问题。

3.4 设计思考

压电能量收集系统能够将机械能转换为电能,在压电换能器参数固定的条件下,性能优越的压电能量收集系统能够获得更高的输出功率。若不考虑变换器的能量转换损失,则压电能量收集系统的性能主要由整流电路的结构决定。整流器的输出功率

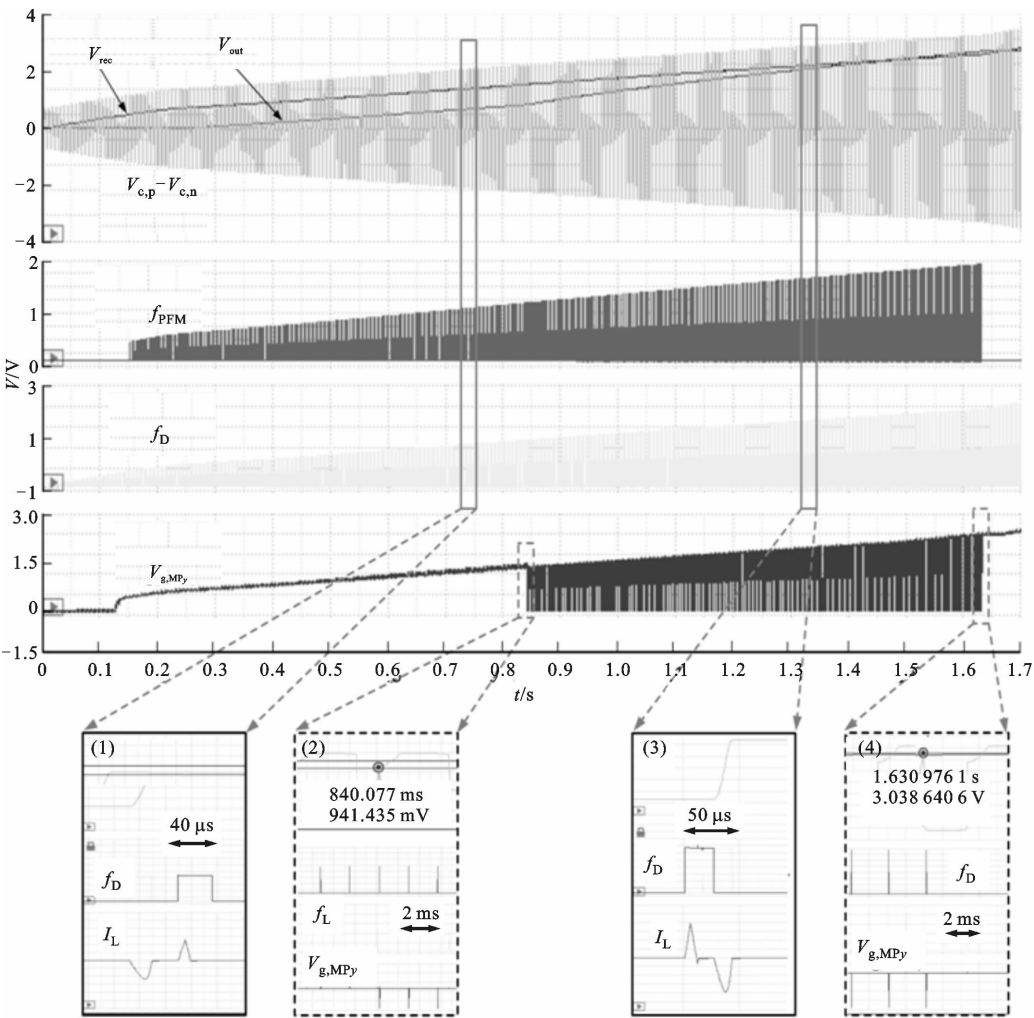


图 10 压电能量收集系统瞬态仿真波形

Fig. 10 Simulated transient waveforms of the piezoelectric energy harvesting system

越高,则压电能量收集系统的性能也越好。

本文采用的 bias-flip 整流器通过 RLC 谐振回路进行压电换能器寄生电容上电荷的翻转,避免了绝大部分电荷的抵消,考虑到压电换能器等效模型中电源类型为正弦电流源,而它在每半个周期提供的电荷总量一定,因此在 V_{rec} 电压一定的条件下,通过优化电路结构减少控制逻辑单元消耗的电荷量,可以有效地提升整流器的输出功率。基于此,所设计的 bias-flip 整流器中,仍然采用了 4 个无源二极管而非比较器加 MOSFET 结构的有源开关来实现整流,也正是考虑到了这个原因。

通过进一步地仿真对比分析发现,在保持压电源参数不变的条件下,采用无源整流方式的 bias-flip 整流器在 V_{rec} 节点可得到 $111.59 \mu\text{W}$ 的输出功率;而采用有源整流方式以后,虽然整流器自身效率得以大幅提升,但是在 V_{rec} 节点只得到了 $103.33 \mu\text{W}$ 的输出功率。这是因为有源整流相对于无源整流,在 V_{rec} 电压相同的条件下,降低了压电换能器两端电压峰值,使压电换能器对应的输出功率减小,并在一定程度上减少了因压电换能器内阻以及电荷翻转而损失的电荷;与此同时,有源结构的控制逻辑电路又需要消耗更多的电荷。因此,在有源整流替换无源整流结构以后,导致 bias-flip 整流器拥有更高的整流效率和更低的输出功率。

4 结 论

本文面向自供能设备的应用,提出了一种具有自适应电感共享策略的超低功耗压电振动能量收集系统,并通过采用标准 180 nm CMOS 工艺,完成了压电能量收集系统的设计工作。仿真结果表明,bias-flip 整流器分别在 2 V 和 3 V 开路电压激励下,输出功率分别达到了 $55.01 \mu\text{W}$ 和 $111.59 \mu\text{W}$,较传统全桥整流器,分别实现了 6.40 倍和 4.48 倍的输出功率提升。引入电感共享策略后,变换器的最大输出功率可达 $110.04 \mu\text{W}$,相比于非电感共享策略,电感共享策略下变换器峰值输出功率提升了 7.9%。与传统整流结构能量收集系统相比,本文提出的新架构体现出极大的优越性,在自获能无线传感场景下具有广泛的应用前景。

参考文献:

[1] 杨洋,张瑞智,张杰,等. 植入式医疗装置的无线通信和能量收集电路[J]. 西安交通大学学报,2018,52(7): 160-166.

YANG Yang, ZHANG Ruizhi, ZHANG Jie, et al. A wireless communication and energy harvesting circuit for implantable medical devices [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(7): 160-166.

[2] 张阳阳,吕朝锋,冯雪. 基于柔性智能器件的心动能量收集技术研究进展[J]. 中国科学(信息科学), 2019, 49(4): 385-404.

ZHANG Yangyang, LV Chaofeng, FENG Xue. Advances in energy harvesting from heartbeat using flexible smart devices: state-of-the-art review [J]. Scientia Sinica(Informationis), 2019, 49(4): 385-404.

[3] 李舟,李喆,刘儒平. 自驱动植入式能源收集器件的研究进展[J]. 集成技术,2020,9(1): 12-27.

LI Zhou, LI Zhe, LIU Ruping. Research progress on self-powered implantable energy harvesting devices [J]. Journal of Integration Technology, 2020, 9(1): 12-27.

[4] 刘卓,欧阳涵,邹洋,等. 基于摩擦纳米发电机的自驱动植入式电子医疗器件的研究[J]. 中国科学(技术科学),2017,47(10): 1075-1080.

LIU Zhuo, OUYANG Han, ZOU Yang, et al. Self-powered implantable electronic medical devices research based on triboelectric nanogenerator [J]. Scientia Sinica(Technologica), 2017, 47(10): 1075-1080.

[5] 钟林成,王永泉,陈花玲. 基于介电弹性软体材料的能量收集: 现状、趋势与挑战[J]. 中国科学(技术科学),2016,46(10): 987-1004.

ZHONG Lincheng, WANG Yongquan, CHEN Hualing. Energy harvesting based on soft material of dielectric elastomers: status, trends and challenges [J]. Scientia Sinica(Technologica), 2016, 46(10): 987-1004.

[6] 徐奇,顾陇,秦勇. 柔性压电纳米发电机[J]. 科学通报,2016,61(12): 1288-1297.

XU Qi, GU Long, QIN Yong. Flexible piezoelectric nanogenerators [J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(12): 1288-1297.

[7] 陈浩,孙权,张鸿,等. 用于超低频信号测量的高精度低功耗增量式模数转换器[J]. 西安交通大学学报,2017,51(6): 79-85.

CHEN Hao, SUN Quan, ZHANG Hong, et al. Incremental analog-to-digital converter with high resolution and low power for measurement of ultra-low-frequency signals [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(6): 79-85.

[8] 焦子豪,张瑞智,金锴,等. 用于高速模数转换器的非对称全差分参考电压缓冲器[J]. 西安交通大学学报,2020,54(5): 109-116.

JIAO Zihao, ZHANG Ruizhi, JIN Kai, et al. Asym-

- metric fully-differential reference voltage buffer for high speed analog-digital convertors [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(5): 109-116.
- [9] 许江涛, 闫创, 段颖哲, 等. 用于植入式医疗设备的低功耗低位逐次逼近型模数转换器 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(3): 12-19.
- XU Jiangtao, YAN Chuang, DUAN Yingzhe, et al. Low power and least significant bit-first successive-approximation analog-to-digital converter for implantable medical devices [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(3): 12-19.
- [10] OTTMAN G K, HOFMANN H F, LESIEUTRE G A. Optimized piezoelectric energy harvesting circuit using step-down converter in discontinuous conduction mode [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(2): 696-703.
- [11] GUYOMAR D, BADEL A, LEFEUVRE E, et al. Toward energy harvesting using active materials and conversion improvement by nonlinear processing [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52(4): 584-595.
- [12] LEFEUVRE E, BADEL A, RICHARD C, et al. A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems [J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2006, 126(2): 405-416.
- [13] RAMADASS Y K, CHANDRAKASAN A P. An efficient piezoelectric energy-harvesting interface circuit using a bias-flip rectifier and shared inductor [C] // Proceedings of the 2009 IEEE International Solid-State Circuits Conference: Digest of Technical Papers. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 296-297.
- [14] RAMADASS Y K, CHANDRAKASAN A P. An efficient piezoelectric energy harvesting interface circuit using a bias-flip rectifier and shared inductor [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2010, 45(1): 189-204.
- [15] KRIHELY N, BEN-YAAKOV S. Self-contained resonant rectifier for piezoelectric sources under variable mechanical excitation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(2): 612-621.
- [16] DU Sijun, SESHIA A A. An inductorless bias-flip rectifier for piezoelectric energy harvesting [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2017, 52(10): 2746-2757.
- [17] FAN Shiquan, ZHAO Liuming, WEI Ran, et al. An ultra-low quiescent current power management ASIC with MPPT for vibrational energy harvesting [C] // Proceedings of the 2017 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1-4.
- [18] FAN Shiquan, WEI Ran, ZHAO Liuming, et al. An ultralow quiescent current power management system with maximum power point tracking (MPPT) for batteryless wireless sensor applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 7326-7337.
- [19] FAN Shiquan, XUE Zhongming, GUO Zhuoqi, et al. An ultra-low power (ULP) zero-current-detector (ZCD) circuit for switching inductor converter applied in energy harvesting system [C] // Proceedings of the 2017 IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium (EDAPS). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1-3.
- [20] MANDAL S, ARFIN S, SARPESHKAR R. Fast start-up CMOS current references [C] // Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 4.
- [21] SANCHEZ D A, LEICHT J, JODKA E, et al. 21.2 A 4 μ W-to-1 mW parallel-SSHI rectifier for piezoelectric energy harvesting of periodic and shock excitations with inductor sharing, cold start-up and up to 681% power extraction improvement [C] // Proceedings of the 2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 366-367.
- [22] SANCHEZ D A, LEICHT J, HAGEDORN F, et al. A parallel-SSHI rectifier for piezoelectric energy harvesting of periodic and shock excitations [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2016, 51(12): 2867-2879.
- [23] ÇİFTCI B, CHAMANIAN S, KOYUNCUOĞLU A, et al. A low-profile autonomous interface circuit for piezoelectric micro-power generators [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems: I Regular Papers, 2021, 68(4): 1458-1471.
- [24] NGUYEN S H, RICHARDSON H, AMIRTHARAJAH R. A bias-flip interface and dual-input DC-DC converter for piezoelectric and RF energy harvesting [C] // Proceedings of the 2021 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 1-5.
- [25] ZHANG Xiwen, LEE H. An efficiency-enhanced auto-reconfigurable $2 \times / 3 \times$ SC charge pump for transcutaneous power transmission [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2010, 45(9): 1906-1922.

(编辑 武红江 刘杨)